

Fiber-optic feed network using series/parallel connected light emitting opto-electronic components

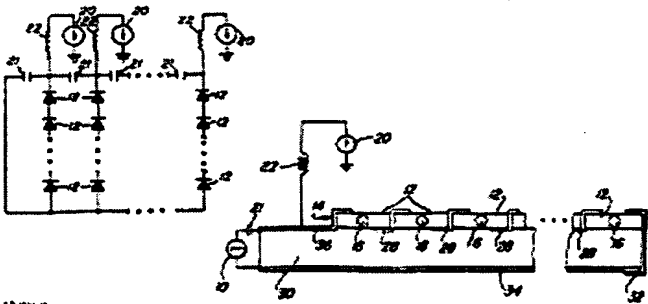
Patent number: DE3789229T  
Publication date: 1994-10-06  
Inventor: DE LA CHAPELLE MICHAEL (US); HSU HUI-PIN (US)  
Applicant: HUGHES AIRCRAFT CO (US)  
Classification:  
- International: H01Q3/26; H04B10/00; H01Q3/26; H04B10/00; (IPC1-7): H01L31/10; H01P1/15  
- european: H01Q3/26G; H04B10/00P  
Application number: DE19873789229T 19871204  
Priority number(s): WO1987US03209 19871204; US19860948339 19861231

Also published as:  
WO8805215 (A1)  
EP0298098 (A3)  
EP0298098 (A2)  
EP0294465 (A1)  
US4832433 (A1)  
more >>

Report a data error here

Abstract not available for DE3789229T  
Abstract of corresponding document: US4832433

The corporate feed network employs light emitting opto-electronic components, such as laser diodes (12), connected together in a string (14) for distributing RF, microwave, MMW, digital signals, and pulse modulated light. Each diode provides two ports or facets which are coupled to optical fibers (16, 18) to connect to an active phased array antenna, for example. The diodes are selected in number and impedance to provide a good wideband impedance match to the RF/microwave/MMW/digital driving source. Multiple series strings of diodes may be employed, connected in parallel for larger corporate feed structures.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

⑧⑦ EP 0 298 098 B1

⑩ DE 37 89 229 T 2

⑤① Int. Cl. 5:  
**H 01 L 31/10**  
H 01 P 1/15

②①	Deutsches Aktenzeichen:	37 89 229.0
⑧⑥	PCT-Aktenzeichen:	PCT/US87/03209
⑧⑥	Europäisches Aktenzeichen:	88 900 731.6
⑧⑦	PCT-Veröffentlichungs-Nr.:	WO 88/05212
⑧⑥	PCT-Anmeldetag:	4. 12. 87
⑧⑦	Veröffentlichungstag der PCT-Anmeldung:	14. 7. 88
⑧⑦	Erstveröffentlichung durch das EPA:	11. 1. 89
⑧⑦	Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	2. 3. 94
④⑦	Veröffentlichungstag im Patentblatt:	6. 10. 94

③① Unionspriorität: ③② ③③ ③①  
31.12.86 US 948339

⑦③ Patentinhaber:  
Hughes Aircraft Co., Los Angeles, Calif., US

⑦④ Vertreter:  
Witte, A., Dipl.-Ing. Dr.-Ing.; Weller, W., Dipl.-Chem.  
Dr.rer.nat.; Gahlert, S., Dipl.-Wirtsch.-Ing.Dr.-Ing.;  
Otten, H., Dipl.-Ing. Dr.-Ing., Pat.-Anwälte, 70178  
Stuttgart

⑧④ Benannte Vertragsstaaten:  
DE, FR, GB, IT, SE

⑦② Erfinder:  
DE LA CHAPELLE, Michael, Canoga Park, CA 91307,  
US; HSU, Hui-Pin, Canoga Park, CA 91306, US

⑤④ SUPERSCHNELLER, LICHTANGEREGETER, DEN PHOTOREAKTIVEN EFFEKT ANWENDENDER  
MIKROWELLEN-SCHALTER/-MODULATOR.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 37 89 229 T 2

DE 37 89 229 T 2

Diese Erfindung bezieht sich auf einen Mikrowellenschalter mit:

- einem einen Diodenübergang definierenden Halbleitermaterial,
- einer photoaktiven Region auf dem Halbleitermaterial, wobei die Reaktanz der photoaktiven Region durch optische Beleuchtung veränderbar ist, und
- einer Quelle auf die photoaktive Region gerichteter optischer Beleuchtung, um neben der photoaktiven Region eine Plasmaregion zu erzeugen.

Ein Mikrowellenschalter dieser Art, aber für das Beispiel einer Avalanche-Diode ist in R.A. Kiehl, "An Avalanching Optoelectronic Microwave Switch", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Band MTT-27, No. 5, Mai 1979, Seiten 533 - 539 offenbart.

Diese Erfindung bezieht sich ebenfalls auf einen entsprechenden Mikrowellenmodulator und auf ein Verfahren zum Verändern, insbesondere zum Schalten und Modulieren elektromagnetischer Signale.

Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf einen Mikrowellenschalter/-modulator, der durch eine optische Beleuchtung einer Laserlichtquelle oder dergleichen gesteuert wird. Die Beleuchtung bewirkt Veränderungen in der Reaktanz der Schalter-/Modulator-photodiode, wodurch ein Resonanzkreis verstimmt wird, der bewirkt, daß HF-Signale reflektiert und nicht absorbiert oder abgegeben werden.

Hochgeschwindigkeits-HF- und -Mikrowellenschalter sind für eine Vielzahl von Anwendungen gebräuchlich. Sie werden oft in Radarempfängern als Austastschalter verwendet, um empfindliche Schaltung vor einer Beschädigung während des Übertragungsimpulses zu schützen. Für diese Anwendung ist schnelles Schalten notwendig, um die Zeitspanne zu minimieren, in der der Empfänger abgeschaltet ist, nachdem der Übertragungsimpuls beendet ist, so daß das Radar nahe Ziele erfassen kann.

Bis jetzt haben Hochgeschwindigkeits-HF- und -Mikrowellenschalter opto-elektronische Mikrowellenschalttechnologie verwendet, die sich auf Photoleitung stützt, um ein Schalten von Mikrowellen zu erreichen. Lichtelektrische oder photoelektrische Leitfähigkeit bedeutet eine Zunahme der Leitfähigkeit mit der Beleuchtung. So stützen sich opto-elektronische Schalter aus dem Stand der Technik auf eine Änderung des Bauteilwiderstandes, um die Schaltfunktion zu bewirken.

Opto-elektronische Mikrowellenschalter aus dem Stand der Technik können nach der Art des Betriebes klassifiziert werden. Plasmaschalter arbeiten durch Bildung eines stark leitenden Plasmas in der elektrischen Bahn der Mikrowellenübertragungsleitung. Das plasmabildende Halbleitermaterial kann sowohl als Ableitungsglied als auch als Serien-Element oder als beides angeordnet werden. Siehe hierzu Platte "Optoelectronic Microwave Switching", IEEE Proceedings, Band 132, No. 2, Seiten 126 - 132, April 1985.

Es wurde ebenfalls vorgeschlagen, Licht zweier verschiedener Wellenlängen zu verwenden, um einen Plasmaschalter ein- und auszuschalten, der wie ein einfacher Spalt einer Mikrostrip-Übertragungsleitung auf einem Halbleitersubstrat aufgebaut ist. Eine Lichtwellenlänge wird in der Oberfläche des Halbleiters absorbiert und bildet ein leitendes Plasma quer über den

Mikrostrip-Spalt und erlaubt somit die HF-Übertragung. Die andere Wellenlänge dringt tiefer in den Halbleiter ein und bildet so ein leitendes Plasma zu Erde, das die auftreffende HF-Energie reflektiert. Für weitere Informationen über diese Technik siehe A.M. Johnson, D.H. Auston, "Microwave Switching By Picosecond Photoconductivity", IEEE - QE, Band QE-11, No. 6, Seiten 283 - 287, Juni 1975.

Plasmaschalter schalten sehr schnell ein (10-100 ps), schalten aber sehr langsam ( $1 \mu\text{s}$  - 1 ms) aus, weil kein elektrisches Feld vorhanden ist, das die Träger entfernt. Die Ausschaltzeit wird von der Trägerrekombination bestimmt, sofern nicht wie oben beschrieben einige Nebenschlußmittel verwendet werden. Ein zweiter Nachteil des Plasmaschalters ist der Bedarf an einem Hochleistungslaser, um ein Plasma über einen großen Bereich oder eine große Oberfläche zu bilden.

Avalanche-Photodiodenschalter sind wegen ihrer hohen Photoleitfähigkeit als Mikrowellenschalter verwendet worden. Die Diode wird typischerweise nahe am Avalanche-Durchbruch vorgespannt, wo eine geringe Menge an Beleuchtung eine Ionisierung des oberen Feldbereiches verursacht. Die Elektron-Loch-Paare ionisieren wiederum andere Atome, wodurch durch Multiplikation große Photoströme erzeugt werden. Für weitere Informationen über diesen Effekt siehe die oben erwähnte Veröffentlichung von R.A. Kiehl. Avalanche-Photodioden schalten vergleichbar langsam, weil der Avalanche-Prozeß viel Zeit braucht, um sich auszubilden. Außerdem rauschen sie und können Wärmeprobleme haben.

Über Vorspannung gesteuerte opto-elektronische Schalter repräsentieren eine ganze Klasse von Schaltern, die Vorspannungssteuerung verwenden, um optische Detektoren ein- und auszuschalten. Eine Photodiode kann zum Beispiel die detektierte, mit Mikrowellen

modulierte Beleuchtung eines Lasers dadurch ein- und ausschalten, daß sie jeweils von Sperr- auf Durchlaßrichtung wechselt. Mit anderen Worten, Photodioden-Detektoren funktionieren nur in Sperrrichtung. Wenn sie auf Durchlaßrichtung geschaltet werden, werden sie keine amplitudenmodulierte Mikrowellenenergie auf einem optischen Träger detektieren. In ähnlicher Weise kann eine Avalanche-Photodiode durch Schalten der Vorspannung auf Avalanche und davon weg ein- und ausgeschaltet werden. Über Vorspannung gesteuerte opto-elektronische Schalter stützen sich folglich auf eine Änderung in der Vorspannung, um zu schalten. Als ein Ergebnis weist diese Art von Schalter beim Schalten dieselbe Geschwindigkeit auf wie eine konventionelle PIN-Diode (in der Größenordnung von 10 ns).

Eine GaAs-Randschichtdiode vom Gold-Typ ist beschrieben in T. Yamamoto und Y. Ota, "The Gold n-Type GaAs Surface Barrier Diode and its Application to Photocapacitors", Solid State Electronics, Band 11, No. 2 (1968.2), Seiten 219 - 224. Die in diesem Dokument diskutierte mit Gold überzogene Diode ist empfindlich gegenüber Beleuchtung und verändert in Abhängigkeit davon ihre kapazitive Reaktanz. Sie wird in Oszillatoren verwendet - jedoch ohne vorgespannt zu sein - und verändert die Frequenz des Oszillators.

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird eine veränderbare Spannung bereitgestellt, um den Diodenübergang in Sperrrichtung zu treiben und dadurch die Betriebsfrequenz des Mikrowellenschalters zu steuern, der am Anfang erwähnt wurde. Auf diese Weise ist der Mikrowellenschalter/-modulator elektronisch einstellbar, so daß die Mikrowellen-Betriebsfrequenz durch Einstellen der Sperrrichtungsspannung für die Photodiode verändert werden kann.

Der Mikrowellenschalter gemäß der vorliegenden Erfindung kann Mikrowellensignale um einen Faktor 10-1000 mal schneller schalten oder modulieren als konventionelle, über Vorspannung gesteuerte Mikrowellenschalter, wie z.B. PIN-Dioden. Die Erfindung setzt eine optisch gesteuerte Diode ein, die Veränderungen in der Diodenreaktanz anstatt im Widerstand als Mechanismus verwendet, um Mikrowellenenergie zu schalten oder zu modulieren. Der optisch gesteuerte Schalter gemäß der Erfindung besitzt ebenfalls eine vollständige Isolation zwischen der Steuerschaltung (Impulsmodulator für den Laser) und dem Mikrowellenschaltkreis, so daß keine ungewünschten Interferenzen oder Transienten in das geschaltete Signal einkoppeln können. Folglich ist die Erfindung für einen großen Bereich von Anwendungen von Hochgeschwindigkeits-HF- und Mikrowellenschaltern verwendbar, einschließlich von EW-Empfängern mit Austastschaltern für Anwendungen, bei denen eine Einstellbarkeit über eine große Bandbreite verwendet werden kann, um wahlweise Störsignale zu empfangen und zu nullen. Die Erfindung ist ebenfalls für Anwendungen mit analogen Modulatoren nützlich, bei denen ein in der Intensität modulierte optisches Signal verwendet werden kann, um ein Mikrowellensignal in der Amplitude zu modulieren. Der Bereich der Anwendungen dieser Erfindung schließt Radar, EW-, HF- und Mikrowellen-Kommunikation sowie Signalverarbeitung ein.

In der Zeichnung:

Fig. 1 ist eine Querschnittsdarstellung einer photoreaktiven Diode und zeigt eine durch Laserbeleuchtung erzeugte Plasmaregion sowie eine durch Vorspannung der Vorrichtung in Sperrrichtung erzeugte Sperrschicht;

- Fig. 2 ist eine vereinfachte Querschnittsdarstellung einer photoreaktiven Diode, wobei die einzelnen Bereiche definiert wurden;
- Fig. 3 ist eine Kurve, die den Absorptionskoeffizienten über der Wellenlänge der Beleuchtung für einen Halbleiter zeigt;
- Fig. 4 ist eine Kurve, die die Leitfähigkeit gegenüber der Tiefe zu der Oberfläche des Halbleiters darstellt;
- Fig. 5(a) ist ein Smith'sches Leitungsdiagramm von gemessenen Reflexionskoeffizienten einer unbeleuchteten Photodiode mit 8 Volt Vorspannung;
- Fig. 5(b) ist ein schematisches Diagramm, das ein aus den S-Parametern entwickeltes Photodiodenmodell zeigt;
- Fig. 6 ist ein Smith'scher Koeffizient bei 8 GHz infolge einer Beleuchtung durch einen 2mW-0,833 $\mu$ m-Laser, bei zwei verschiedenen Vorspannungen;
- Fig. 7(a) ist ein schematisches Diagramm einer resonanten Impedanzanpassungsschaltung, die im Zusammenhang mit der Erfindung erforderlich ist;
- Fig. 7(b) ist ein Layout der Schaltung aus Fig. 7(a) auf Mikrostrip-Substrat;
- Fig. 8(a) ist eine Kurve, die den Rücklaufverlust über der Frequenz für einen Schalter zeigt, der die Impedanzanpassungsschaltung aus Fig. 7(a) verwendet, und zeigt den Abstimmeeffekt von Sperrvorspannung;
- Fig. 8(b) ist eine Kurve, die die Frequenz des Spitzenrücklaufverlustes über der Sperrvorspannung darstellt, wobei die Sättigung gezeigt ist, wenn die Photodiode durchschlägt;
- Fig. 9 ist eine Kurve, die den Rücklaufverlust über der Frequenz bei einer Photodiode zeigt, die durch einen 2mW-0,33 $\mu$ m-Laser beleuchtet ist, wobei weiter der beleuchtete und der unbeleuchtete Zustand gezeigt sind;



Fig.10(a) ist ein schematisches Blockdiagramm des Reflexions-/Absorptionsschalters, der einen Zirkulator verwendet, um die Eingangs- und Ausgangssignale zu trennen;

Fig.10(b) ist eine Kurve, die die Isolation/Einfügungsdämpfung über der Frequenz darstellt, wobei die aktuelle Wirkungsweise des Schalters für zwei Vorspannungen gezeigt ist; und

Fig.11(a) und 11(b) sind schematische Blockdiagramme einer photoreaktiven Diode, die in zwei verschiedenen Transmissions-/Reflexions-Schaltschemata mit zwei Toren verwendet wird.

#### BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

Die vorliegende Erfindung verwendet einen Mechanismus, in dem sich die Reaktanz der Photodiode mit der Beleuchtung verändert. Dieser Mechanismus wird im folgenden als der "photoreaktive Effekt" bezeichnet. Photoreaktanz wird durch die Bildung von Plasma auf der Oberfläche einer Photodiode verursacht, was daraus resultiert, daß in der aktiven Region der Vorrichtung Photonen mit Atomen zusammenstoßen (Ionisierung). Unter Bezugnahme auf die Figuren 1 und 2 umfaßt die photoreaktive Diode 20 einen ohmschen Kontakt 22, eine verarmungsfreie Region 24, eine Sperrschicht 26, eine Plasma-Region 28 und einen Schottky-Kontakt-Ring 30. Die Dicke der Plasma-Region  $t_p$  nimmt mit der Beleuchtung auf die Photodiode zu. Eine Sperrschicht der Dicke  $t_s$  wird in einer in Sperrrichtung betriebenen Diode ausgebildet.

Die Kapazität der Photodiode kann durch das einfache Modell paralleler Platten wie folgt angenähert werden:

$$C = \frac{\epsilon A}{t_d - t_p} \quad (1)$$

A ist dabei die aktive Fläche der Photodiode.

Diese Gleichung zeigt, daß ein Erhöhen der Plasmadicke durch Erhöhen der Beleuchtung bewirkt, daß die Photodiodenkapazität zunimmt.

Die Verarmungsdicke als Funktion der Sperrvorspannung für eine Schottky-Diode ist gegeben durch:

$$t_d = \frac{2}{qN_d} \left( V_{bi} - V_d - \frac{kT}{q} \right) \quad (2)$$

wobei:  $N_d$  = Donatorstörsstellendichte,  $V_{bi}$  = eingebautes Potential,  $V_d$  = Sperrvorspannung und  $T$  = Temperatur. Diese Gleichung zeigt, daß die Verarmungsbreite mit der Vorspannung zunimmt. Deshalb tritt der maximale photoreaktive Effekt bei Spannungen auf, bei denen die Verarmungsdicke nur geringfügig größer als die Plasmadicke ist, so daß  $t_d - t_p$  klein ist.

Ein Photon wird in einem Halbleitermaterial absorbiert und erzeugt ein Elektron-Loch-Paar, wenn seine Energie größer oder gleich dem Bandabstand  $E_g$  ist, d.h.:

$$h\nu > E_g, \text{ wobei } \nu = c/\lambda \quad (3)$$

Deshalb gibt es eine kritische Wellenlänge der Beleuchtung, oberhalb der Transmission und unterhalb der Absorption von Photonen stattfindet, d.h.:

$$\lambda_c = \frac{h_c}{E_g} = \frac{1.24}{E_g} \quad (4)$$

Damit diese Erfindung funktioniert, muß folglich Absorption von Photonen unter Verwendung von Beleuchtung bei Wellenlängen geschehen, die kleiner als die kritische Wellenlänge sind,  $\lambda < \lambda_c$ .

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  ist ein Maß für den Grad, zu welchem ein Halbleiter Photonen absorbiert, und ist natürlich eine Funktion der Wellenlänge, wie es in Fig. 3 gezeigt ist.

Die Verteilung von Elektron-Loch-Paaren, die durch Beleuchtung eines Halbleiter erzeugt wurden, ist gegeben durch:

$$N(x) = N_0 e^{-\alpha x} \quad (5)$$

wobei  $N_0$  die Oberflächenträgerdichte ist. Deshalb ist  $\theta$ , die Leitfähigkeit, als eine Funktion der Tiefe von der Oberfläche des Halbleiters gegeben durch:

$$\begin{aligned} \theta(x) &= qN(x) (Mn+M) = qN_0 (\mu_n + \mu_p) e^{-\alpha x} \\ &= \theta_0(I) \cdot e^{-\alpha x} \end{aligned} \quad (6)$$

wobei  $\theta_o(I)$  die Oberflächenleitfähigkeit ist, die eine Funktion der Beleuchtungsintensität ist. Die Leitfähigkeit gegen die Tiefe ist in Fig. 4 für zwei verschiedene Beleuchtungspegel aufgetragen. Die exponentielle Leitfähigkeitsverteilung kann durch eine Rechteckverteilung angenähert werden, wie es in Fig. 4 durch die gestrichelte Linie von Leitfähigkeit  $\theta_p$  und Dicke  $t_p$  gezeigt ist. Die effektive Plasmadicke ist als eine Region von nahezu metallischer Leitfähigkeit definiert, wobei  $\theta_p$  in der Größenordnung von  $10^5$  Siemens/cm oder größer ist. Aus Fig. (6) ergibt sich die effektive Plasmadicke zu:

$$t_p = \alpha^{-1} \ln [\theta_o(I) / \theta_p] \quad (7)$$

Substituiert man die Gleichungen (7) und (2) in (1), so ergibt sich ein Näherungsausdruck für die Photodiodenkapazität als Funktion der Vorspannung und der Beleuchtung.

$$C_d = \frac{\epsilon A}{(2\epsilon / qN_d) (V_{bi} - V_d - V - kT/q) - \alpha^{-1} \ln [\theta_o(I) / \theta_p]} \quad (8)$$

Gleichung (8) zeigt, daß die Kapazität mit zunehmender Beleuchtung und mit abnehmender Vorspannung zunimmt. Die Kapazität wird sehr groß, wenn sich  $t_p$  an  $t_d$  annähert. Wenn  $t_p = t_d$  ist, geht der Nenner der Gleichungen (1) und (8) auf null und die Kapazität geht auf unendlich. Dies geschieht, wenn die Plasmaregion die Sperrschicht überspannt. In diesem Falle wird es eine große Änderung in dem Widerstand sowie in der Reaktanz der Photodiode geben.

In erster Ordnung wird die Sperrschichtbreite durch die Anwesenheit des Plasma nicht betroffen, weil das Plasma ladungsneutral ist, es enthält ebenso viele Löcher wie Elektronen. Die Gleichgewichtsdichte an Ladungsträgern innerhalb der Plasma-Region ist durch die Rate bestimmt, bei der Elektronen und Löcher erzeugt werden, durch die Rate, mit der sie driften und sich verteilen, sowie durch ihre Rekombinationszeiten. Elektronen und Löcher werden durch das in der Sperrschicht vorhandene elektrische Feld getrennt und geführt. Die Elektronen werden quer über die Sperrschicht geführt und erzeugen einen äußeren Photostrom, während die Löcher sich in die entgegengesetzte Richtung bewegen und unmittelbar an dem Schottky-Kontakt gesammelt werden. Die Raumladung der Elektronen, die durch die Driftregion wandern, wird das elektrische Feld verringern, aber dies wird als Effekt zweiter Ordnung angesehen und vernachlässigt.

Die gemessenen Reflexionskoeffizienten ( $S_{11}$ ) als Funktion der Frequenz für eine unbeleuchtete GaAs-Schottky-Photodiode mit 50  $\mu\text{m}$  Durchmesser sind in das Smith-Diagramm aus Fig. 5A eingetragen. Die Daten der S-Parameter sind an das Modell aus Fig. 5B angepaßt, wobei  $C_d$  die Sperrschichtkapazität,  $R_d$  der Kontaktwiderstand, und  $L_d$  die Induktivität des Verbindungsdrahtes ist.

Eine Beleuchtung des aktiven Bereiches der Photodiode mit 2mW optischer Energie von einer miniaturisierten GaAlAs-Laserdiode bewirkt, daß sich der Reflexionskoeffizient bei 8 GHz leicht verschiebt, wie es in Fig. 6 gezeigt ist. Die Änderung bei  $S_{11}$  ist rein reaktiv und entspricht einer Zunahme der Sperrschichtkapazität mit der Beleuchtung von 0,52 pF auf 0,59 pF bei 8 Volt Vorspannung. Bei 2 Volt Vorspannung ändert sich die Kapazität mit der Beleuchtung von 1,47 pF auf 1,81 pF. Es gibt

bei 2 Volt Vorspannung eine größere Änderung in der Sperrschichtkapazität als bei 8 Volt Vorspannung. Dies ergibt sich aus der Tatsache, daß die Sperrschichtbreite bei 2 Volt Vorspannung viel geringer ist als bei 8 Volt Vorspannung.

Eine einfache Mikrowellen-Anpassungsschaltung wurde entworfen und hergestellt, die 50 Ohm an die Impedanz der unbeleuchteten Photodiode bei 8 GHz anpaßt. Die Anpassungsschaltung umfaßt eine Serieninduktivität und einen Viertelwellenlängen-Impedanzwandler, wie es in Fig. 7a gezeigt ist. Die Serieninduktivität ist so ausgewählt, daß sie bei 8 GHz mit der unbeleuchteten Kapazität der Photodiode  $C_m$  schwingt.

$$L_m = \frac{1}{\omega^2 C_{du}} - L_b = 0.24 nH. \quad (9)$$

$L_m$  beseitigt den reaktiven Teil der Photodioden-Impedanz, so daß der reale Teil  $R_d$  verbleibt.  $R_d$  ist an 50 Ohm angepaßt, wobei ein Standard-Viertelwellenlängen-Wandler der Impedanz  $Z_m$  verwendet wird, wobei:

$$Z_m = 50 * R_d = 12 \text{ Ohm} \quad (10)$$

Ein Wandler von so geringer Impedanz kann günstig auf Mikrostrip realisiert werden, indem ein dünnes Substrat mit hoher Dielektrizitätskonstante verwendet wird. Aus diesen Gründen wird 0,254 mm (10 mil) dickes Aluminium ausgewählt. Die Serienanpassungsinduktivität wird als ein kurzer Abschnitt einer Übertragungsleitung hoher Impedanz auf Mikrostrip realisiert. Ein Layout der Schaltung ist in Fig. 7b gezeigt. Andere Anpassungsschaltungen mit zwei Elementen sind ebenfalls für

diese Anwendung geeignet. Die Anpassungsschaltungen können an anderen Mikrowellenübertragungsmedien verwirklicht werden, wie z.B. an einer koaxialen Leitung, an einem Wellenleiter und an einer Streifenleitung.

Die Impedanzanpassungsschaltung ist so entworfen, daß sie einen hohen Rücklaufverlust ihrer Eingabe über ein schmales Band um die Mittenfrequenz (8 GHz) gibt. Die Mittenfrequenz, bei der der Rücklaufverlust seinen Spitzenwert aufweist, kann variiert werden, indem die Sperrspannung für die Photodiode eingestellt wird. Die Abstimmung rührt von der Änderung der Sperrschichtkapazität mit der Vorspannung her, wie es durch Gleichung (9) gegeben ist. Eine Auftragung des Rücklaufverlustes gegen die Frequenz für verschiedene Sperrvorspannungen ist in Fig. 8a gezeigt. Die Frequenz, bei der der Spitzenwert des Rücklaufverlustes auftritt, ist in Fig. 8b als Funktion der Vorspannung aufgetragen. Es ist zu bemerken, daß die Frequenz bei höheren Vorspannungen abnimmt, wenn die Diode durchbricht.

Eine Beleuchtung der Diode bewirkt ebenfalls, daß sich die Sperrschichtkapazität wie oben beschrieben ändert. Fig. 9 zeigt den Rücklaufverlust über der Frequenz für eine beleuchtete (unter Verwendung eines GaAlAs-Lasers von  $0,833 \mu\text{m}$  Wellenlänge) und eine unbeleuchtete Photodiode mit 8 Volt Vorspannung. Die Resonanzfrequenz verschiebt sich um 300 MHz, was einer Veränderung in  $C_d$  von 0,55 pF im unbeleuchteten Zustand auf 0,59 pF im beleuchteten Zustand entspricht. Die Zunahme in der Kapazität ist der Bildung einer Plasma-Region in der Diode zuzuschreiben, wie es oben beschrieben wurde.

Weil die Wellenlänge des optischen Steuersignales ( $0,833 \mu\text{m}$ ) aus dem GaAlAs-Laser geringfügig kürzer ist als die kritische Wellenlänge der GaAs-Photodiode ( $0,900 \mu\text{m}$ ), werden in der

Photodiode Photonen absorbiert, um ein Plasma zu erzeugen, wie es durch Gleichung (4) beschrieben ist.

Fig. 9 zeigt, daß der Rücklaufverlust bei 8 GHz von 25 dB auf 3 dB verändert werden kann, indem die Photodiode einfach mit 2 mW von optischer Energie beleuchtet wird. Das Licht wird über eine optische Faser auf die aktive Fläche der Photodiode gerichtet.

Die Schaltung kann zu einem nützlichen Schalter gemacht werden, indem ein Zirkulator mit dem Eingang verbunden wird (siehe Fig. 10a). Wenn der Rücklaufverlust weg von der Schaltung hoch ist, wird auftreffende Energie absorbiert und der Schalter ist in dem Zustand hoher Isolation. Wenn der Rücklaufverlust gering ist, wird auftreffende Energie reflektiert und die Vorrichtung ist in dem Zustand mit geringem Einfügungsverlust. Die Arbeitsweise des Schalters bei zwei verschiedenen Vorspannungen ist in Fig. 10b gezeigt. Man beachte, daß die Frequenzverschiebung wegen der Beleuchtung für kleinere Sperrvorspannungen viel größer ist, wie es durch Gleichung (8) erklärt wird.

Wenn auch die Erfindung inhärent schmalbandig (5 %) ist, kann doch die Betriebsmittelfrequenz elektronisch über eine Bandbreite von 25 % abgestimmt werden, indem die in Sperrichtung angelegte Vorspannung verändert wird. Die Erfindung hat Betrieb im X-Band gezeigt, obwohl es theoretisch möglich ist, einen photoreaktiven Schalter/Modulator zu entwerfen, der bei MMW-Frequenzen funktioniert.

Die Erfindung schaltet Zustände in der Größenordnung von 10 ps, was die Zeit ist, die benötigt wird, um das leitende Plasma zu bilden. Die Ausschaltzeit wird durch die Zeit bestimmt, die



das Plasma benötigt, um zu rekombinieren, zu diffundieren oder durch das elektrische Feld abgeführt zu werden. Der Vorteil dieses Schalters liegt darin, daß das Plasma in einem Bereich eines hohen elektrischen Feldes gebildet wird, so daß die meisten der Ladungsträger schnell abgeführt werden, wenn die Beleuchtung beendet wird. Andere Plasmaschalter, die mit Photoleitfähigkeit arbeiten und in technischen Zeitschriften beschrieben sind, bilden Plasmas in voluminösen Halbleitern, wobei kein elektrisches Feld vorhanden ist, um Ladungsträger abzuführen. Die Ausschaltzeit bei anderen Plasmaschaltern ist durch die Rekombinationszeit der Ladungsträger bestimmt.

Diese Erfindung kann einen Laser geringer Leistung verwenden, um die optischen Steuerpulse oder die optische Modulation zu erzeugen. Ein Laser ist eine Schwellwertvorrichtung --, wenn der Vorstrom einen bestimmten Schwellenwert übersteigt, beginnt er fast augenblicklich zu schwingen. Der Laser der Ortel Corporation kann verwendet werden, um die Erfindung in Picosekundengeschwindigkeit aus- und einzuschalten. Es gibt keine Testgeräte, die die Messung von derart schnellen Picosekundenimpulsen ermöglichen. Statt dessen haben wir die Schaltgeschwindigkeit der Vorrichtung durch Modulation des Lasersteuersignales mit einer Sinuswelle bei X-Band-Frequenzen bestimmt. Die Photodiode sprach auf optische Steuersignale im X-Band an, was eine Schaltgeschwindigkeit in der Größenordnung von 10 ps anzeigt und eine Verbesserung um einen Faktor 1000 gegenüber einem konventionellen PIN-Diodenschalter darstellt.

Von besonderem Interesse für einige praktische Anwendungen ist ein Transmissions-/Reflexionsschalter mit zwei Toren, der eine photoreaktive Diode anstatt des oben beschriebenen Reflexions-/Absorptionsschalters mit einem Eingang verwendet. Der Ersterwähnte erfordert keinen Zirkulator, um die Eingangs- und

Ausgangssignale zu trennen, und kann verwendet werden, um HF-Energie hoher Leistung zu schalten. Schalter mit zwei Toren können so hergestellt werden, wie es in Fig. 11 schematisch gezeigt ist. Die beiden Schematas arbeiten mit durch Beleuchtung der Photodiode bewirkte Verstimmung einer Resonanzschaltung mit hohem Q. Die Resonanzschaltung wird durch die Kapazität  $C_{du}$  der unbeleuchteten Photodiode und eine Induktivität  $L_R$  der Resonanzschaltung gebildet.  $L_R$  wird wie folgt ausgewählt:

$$L_R = \frac{1}{\omega_0^2 C_{du}} \quad (11)$$

wobei  $\omega_0$  die Betriebsfrequenz des Schalters ist. Beide Schalter reflektieren eintreffende Mikrowellensignale bei der Frequenz  $\omega_0$ , wenn die Photodiode unbeleuchtet ist. Bei Beleuchtung wird die Resonanzschaltung verstimmt, was es dem Signal ermöglicht, übertragen zu werden. Das Entwurfsverfahren und die Funktion des Schalters ist im wesentlichen dieselben wie oben beschrieben.

Obwohl die Erfindung im Zusammenhang mit einem Gallium-Arsenid (GaAs)-Halbleiter für eine Beleuchtung bei  $0,8 \mu\text{m}$  Wellenlänge beschrieben wurde, kann die Erfindung genauso gut mit anderen Halbleitermaterialien ausgeübt werden. Im allgemeinen wird das Halbleitermaterial so ausgewählt, daß es zu der bestimmten Wellenlänge der Beleuchtung paßt. Geeignete Materialien sind: Silizium (Si), Germanium-Arsenid (GeAs) und Gallium-Arsenid (GaAs) für Beleuchtung bei  $0,8 \mu\text{m}$ ; Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) und Indium-Arsenid-Phosphat (InGaAsP) für Beleuchtung bei  $1,3 \mu\text{m}$ ; und Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) für eine Beleuchtung von  $1,55 \mu\text{m}$ .

Aus dem Vorstehenden ist zu verstehen, daß die vorliegende Erfindung einen Mikrowellenschalter/-modulator schafft, der den photoreaktion Mechanismus verwendet, um bei sehr hoher Geschwindigkeit zu schalten. Die Erfindung ist auf einen weiten Bereich von Frequenzen einschließlich Mikrowellen, HF- und MMW-Frequenzen anwendbar.

Patentansprüche

1. Mikrowellenschalter, mit:

- einem einen Diodenübergang definierenden Halbleitermaterial (24, 26),
- einer photoaktiven Region auf dem Halbleitermaterial (26), wobei die Reaktanz der photoaktiven Region durch optische Beleuchtung veränderbar ist,
- einer Quelle auf die photoaktive Region gerichteter optischer Beleuchtung, um neben der photoaktiven Region eine Plasmaregion (28) zu erzeugen,

gekennzeichnet durch eine veränderbare Spannungsversorgung, um den Diodenübergang in Sperrrichtung zu betreiben und dadurch die Betriebsfrequenz des Mikrowellenschalters zu steuern.

- 2. Mikrowellenschalter nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die veränderbare Spannungsversorgung eine verarmte Region (26) und eine verarmungsfreie Region (24) hervorruft.
- 3. Mikrowellenschalter nach Anspruch 1 oder 2, bei dem die Tiefe der Plasmaregion (28) in Abhängigkeit von der Energie der optischen Beleuchtung veränderbar ist, die von der photoaktiven Region empfangen wird.
- 4. Mikrowellenschalter nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Reaktanz des Diodenüberganges mit der Tiefe der Plasmaregion (28) veränderlich ist.

5. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Quelle optischer Beleuchtung eine steuerbare Quelle ist.
6. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch
  - Mittel zum Einfügen des Diodenüberganges in einen Pfad eines elektromagnetischen Signales, wobei das elektromagnetische Signal durch Steuerung der Quelle optischer Beleuchtung geschaltet werden kann, und
  - einen Resonanzkreis, der an den Diodenübergang gekoppelt ist, um selektiv verstimmt zu werden, wenn die photoaktive Region beleuchtet ist.
7. Mikrowellenschalter nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Resonanzkreis eine Impedanzanpassungsschaltung ( $Z_M$ ,  $L_m$ ) ist, die an den Diodenübergang gekoppelt ist, um im wesentlichen die Reaktanz des Diodenüberganges zu negieren und in Resonanz schwingen zu lassen, wenn das photoaktive Gebiet nicht beleuchtet ist.
8. Mikrowellenschalter nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Impedanzanpassungsschaltung ( $Z_M$ ,  $L_m$ ) die Reaktanz des Diodenüberganges auf eine Systemimpedanz von nominal fünfzig Ohm transformiert.
9. Mikrowellenschalter nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Impedanzanpassungsschaltung ( $Z_M$ ,  $L_m$ ) und der Diodenübergang einen Reflektions-/Absorptionsschalter mit einem Tor definieren.

10. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Halbleitermaterial (24, 26) wenigstens einen Ohmschen Kontakt (22) umfaßt.
11. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Halbleitermaterial (24, 26) wenigstens einen Schottky-Kontakt (30) umfaßt.
12. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Halbleitermaterial (24, 26) ausgewählt ist aus der aus Silizium, Gallium-Arsenid, Germanium-Arsenid, Indium-Gallium-Arsenid und Indium-Gallium-Arsenid-Phosphat bestehenden Gruppe.
13. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Quelle optischer Beleuchtung ein Laser ist.
14. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch einen Zirkulator, um getrennte Eingangs- und Ausgangstore zu dem Diodenübergang bereitzustellen.
15. Mikrowellenschalter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch eine in Resonanz schwingende Induktivität ( $L_R$ ), welche an den Diodenübergang gekoppelt ist, um einen Transmissions-/Reflektionsschalter mit zwei Toren zu definieren.
16. Mikrowellenmodulator, dadurch gekennzeichnet, daß er einen Mikrowellenschalter nach wenigstens einem der Ansprüche 6 bis 15 umfaßt, und bei dem die Modulation der Quelle optischer Beleuchtung es bewirkt, daß ein dem Diodenübergang zugeführtes Mikrowellensignal amplitudenmoduliert wird.

17. Verfahren zum Verändern, insbesondere Schalten oder Modulieren elektromagnetischer Signale, mit den Schritten:

- Liefern der elektromagnetischen Signale zu einem photoreaktiven Material, das durch einen Diodenübergang definierendes Halbleitermaterial (24, 26) und eine photoaktive Region auf dem Halbleitermaterial (26) definiert ist, wobei die Reaktanz der photoaktiven Region durch optische Beleuchtung veränderbar ist,
- Beleuchten der photoaktiven Region mit einer Quelle optischer Beleuchtung, um neben der photoaktiven Region eine Plasmaregion (28) zu bilden,

gekennzeichnet durch den Schritt

- Zuführen eines veränderbaren Spannungsversorgungssignales zu dem Diodenübergang, um den Diodenübergang in Sperrichtung zu betreiben und dadurch die Betriebsfrequenz der elektromagnetischen Signale zu steuern.

18. Verfahren nach Anspruch 17, gekennzeichnet durch den Schritt

- Steuern der Quelle optischer Beleuchtung.

19. Verfahren nach Anspruch 17 oder Anspruch 18, gekennzeichnet durch den Schritt

- Koppeln eines Resonanzkreises an den Diodenübergang, um den Diodenübergang selektiv zu verstimmen, wenn die photoaktive Region beleuchtet ist.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 19, gekennzeichnet durch den Schritt
  - Auswählen des Halbleitermaterials (24, 26) aus der aus Silizium, Gallium-Arsenid, Germanium-Arsenid, Indium-Gallium-Arsenid und Indium-Gallium-Arsenid-Phosphat bestehenden Gruppe.
21. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 20, gekennzeichnet durch den Schritt
  - Verbinden eines Zirkulators mit dem Diodenübergang, um getrennte Eingangs- und Ausgangstore zu dem Diodenübergang bereitzustellen.
22. Verfahren nach einem der Ansprüche 17 bis 21, gekennzeichnet durch den Schritt
  - Koppeln einer in Resonanz schwingenden Induktivität ( $L_R$ ) an den Diodenübergang, um einen Transmissions-/Reflektionsschalter mit zwei Toren zu definieren.



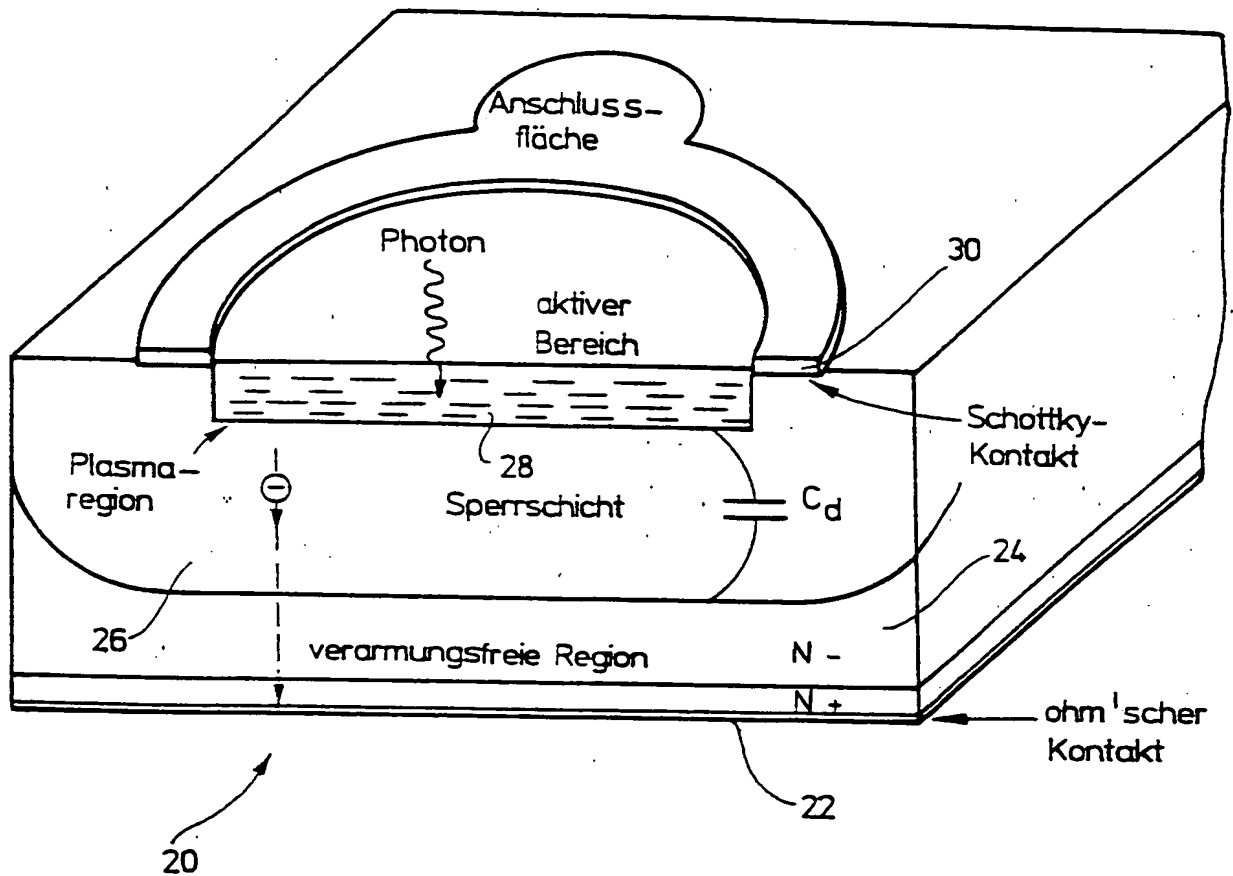


Fig. 1

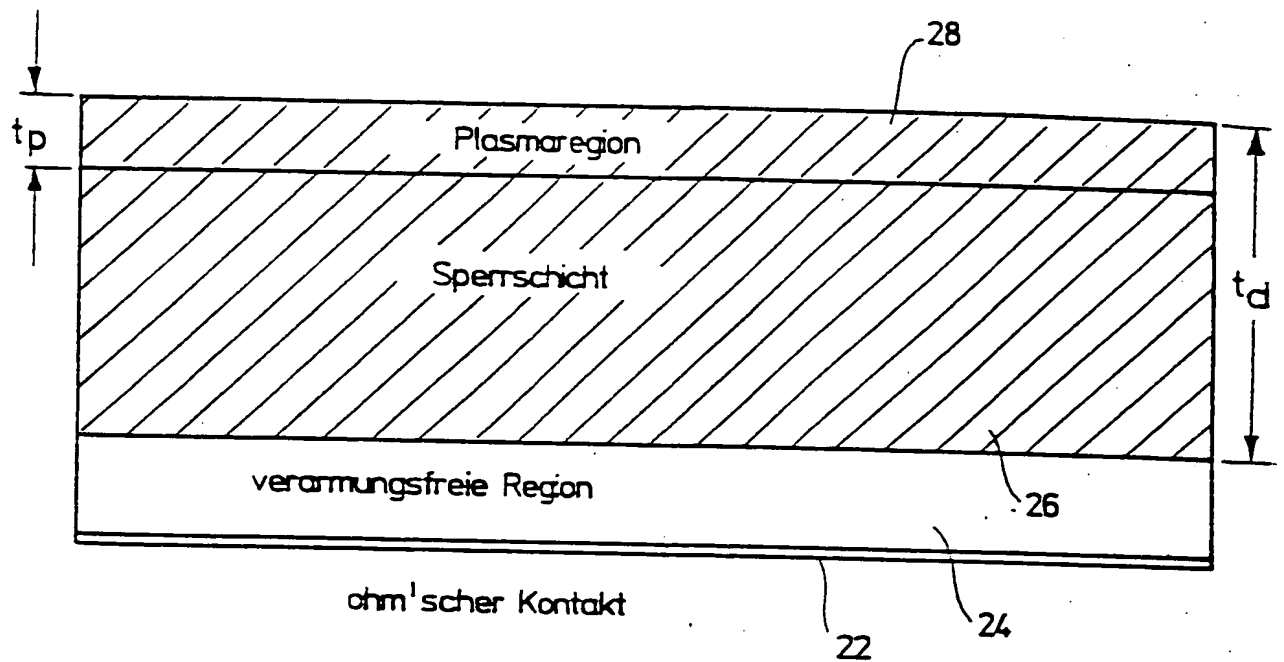


Fig. 2

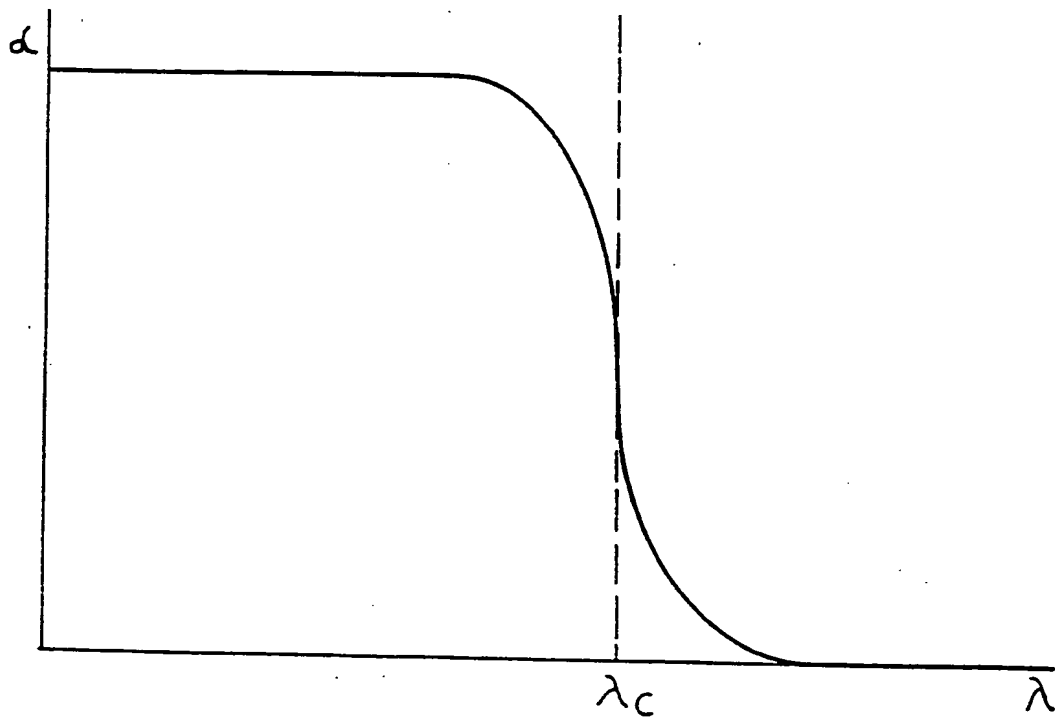


Fig. 3

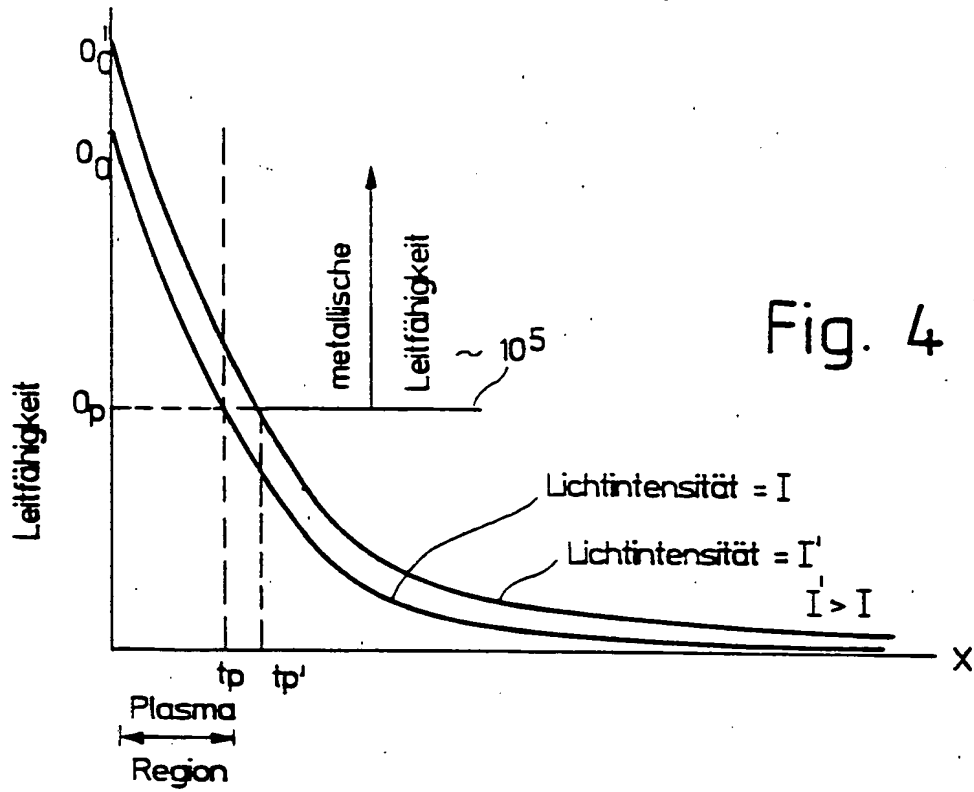


Fig. 4

Fig. 5A

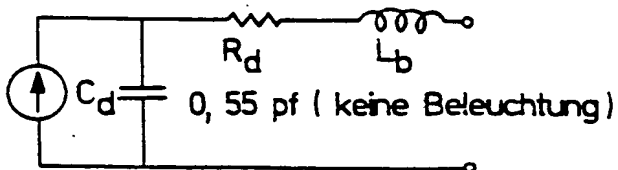
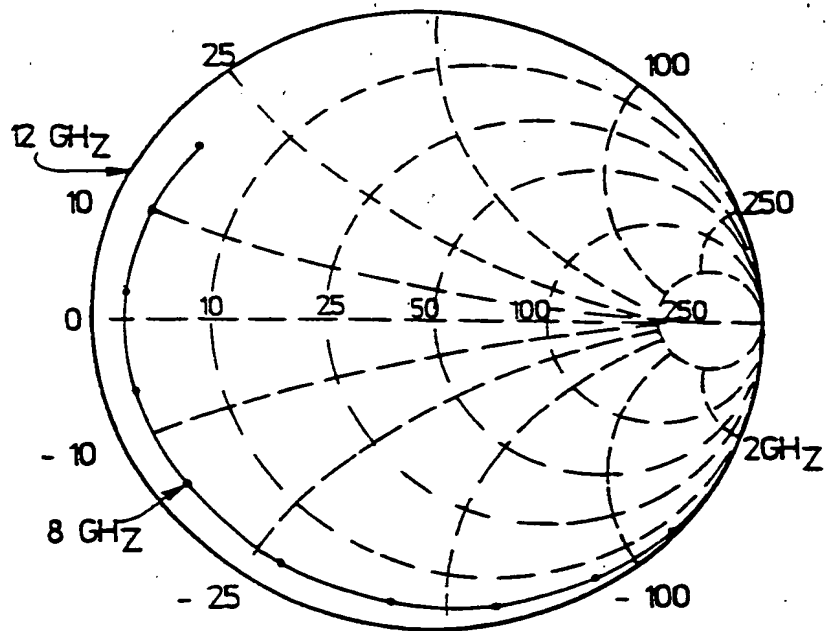


Fig. 5B

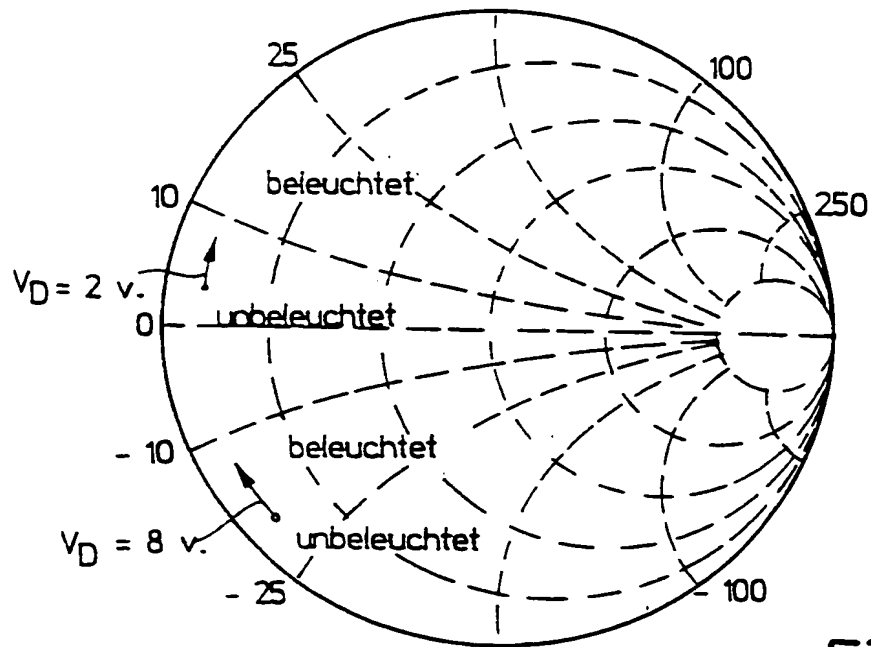


Fig. 6

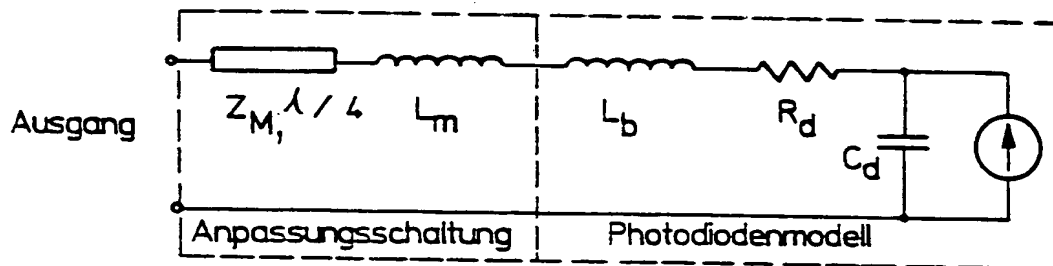


Fig. 7A

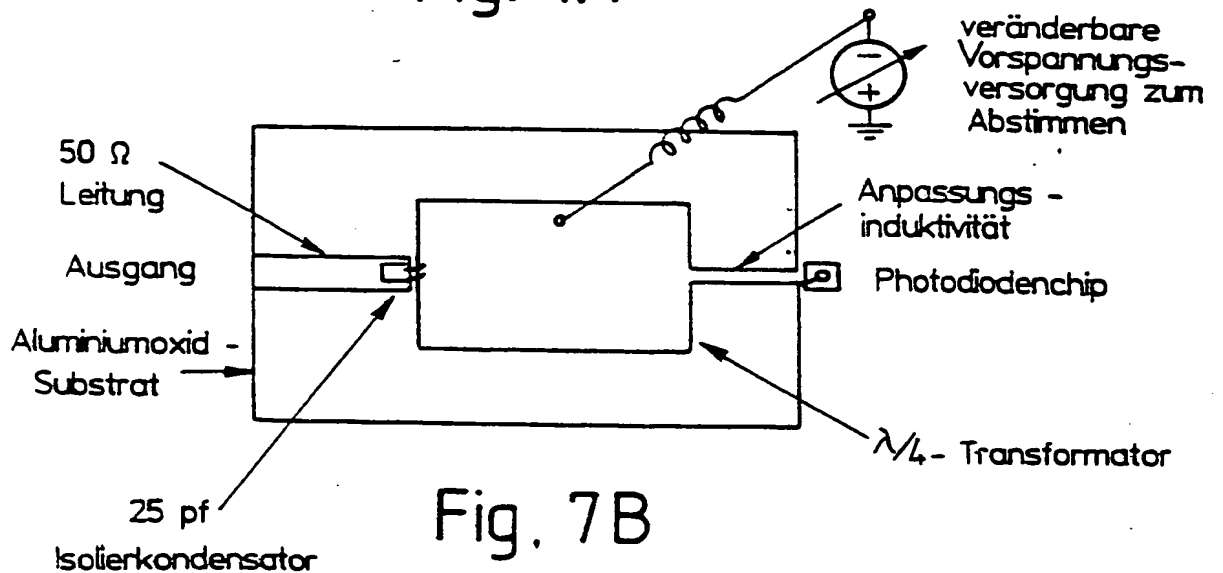


Fig. 7B

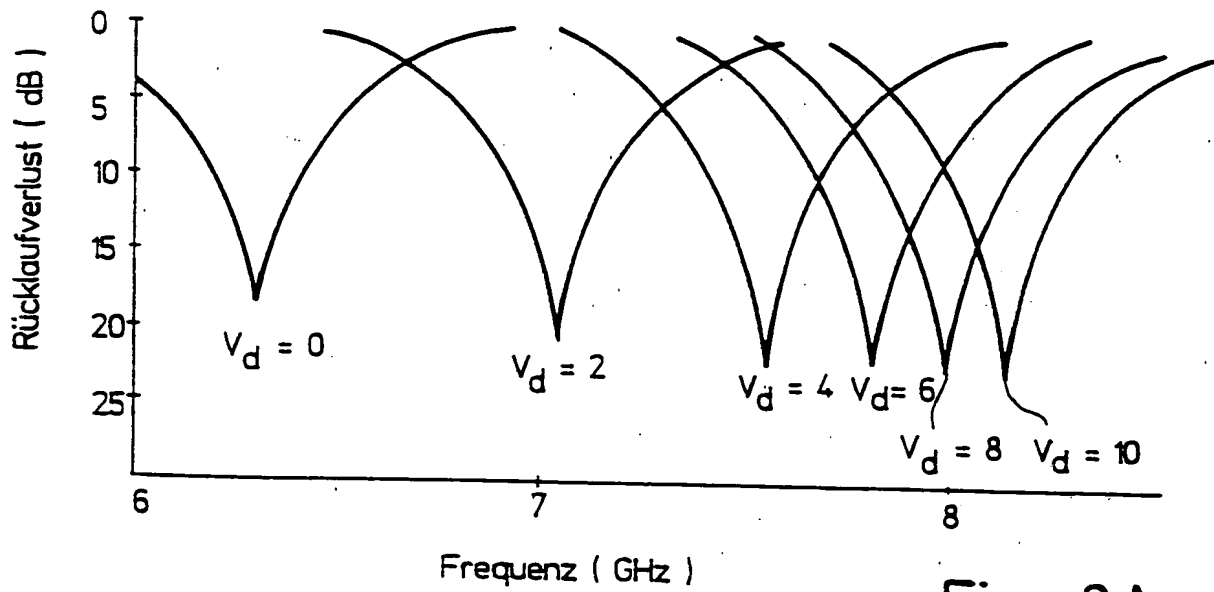


Fig. 8A

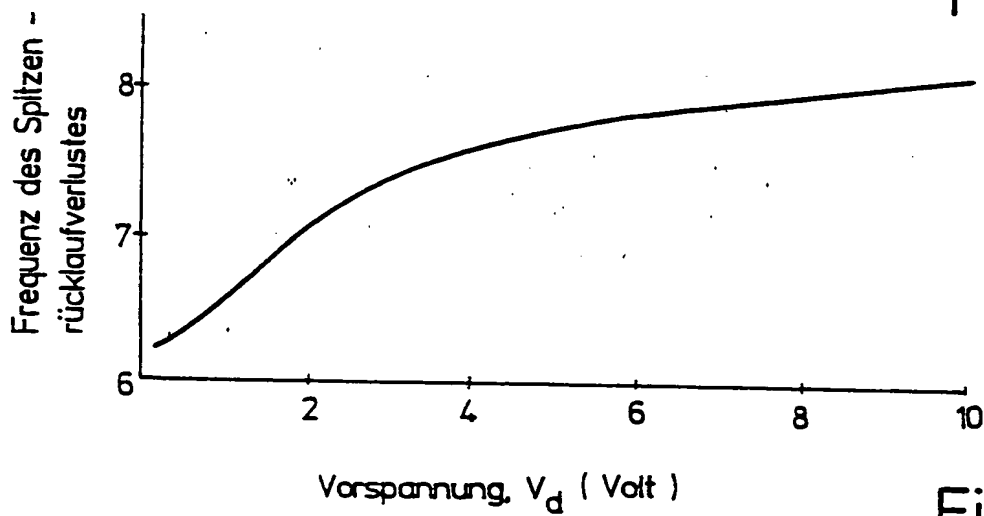


Fig. 8B

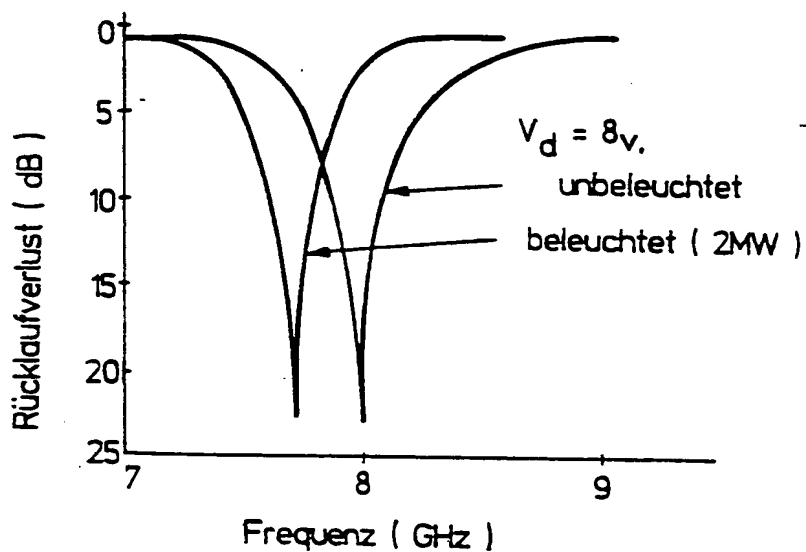


Fig. 9

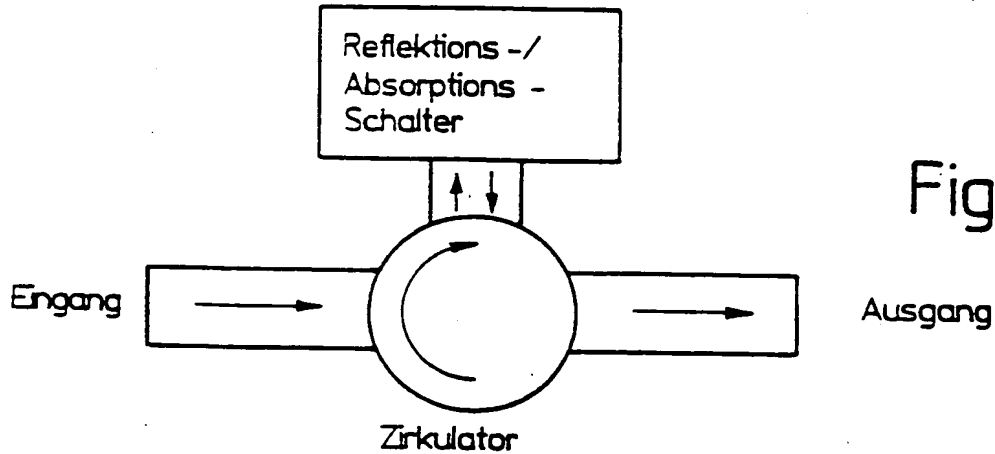


Fig. 10A

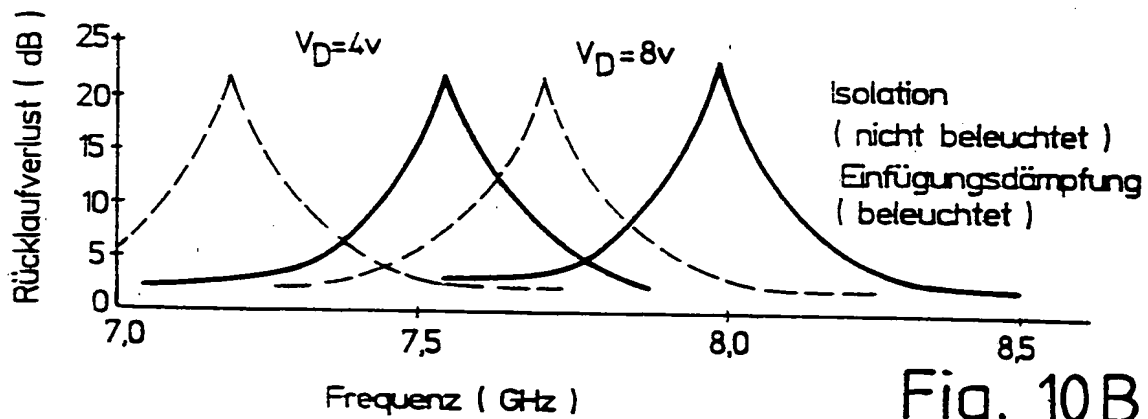


Fig. 10B

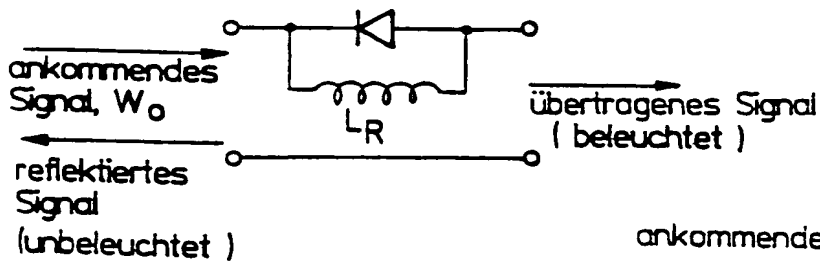


Fig. 11A

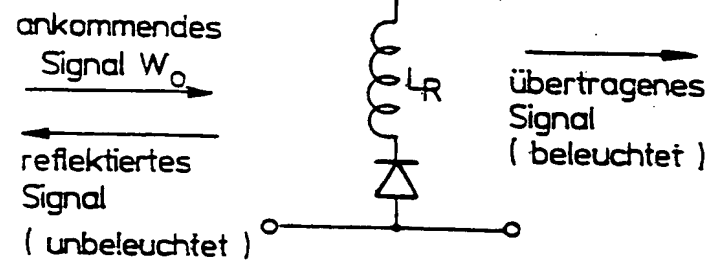


Fig. 11B

$$L_R = \frac{I}{W_0 2C_{d4}}$$

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☒ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**